

16 SUBSIDENZA

LAURA CARBOGNIN¹, PIETRO TEATINI¹, LUIGI TOSI¹, TAZIO STROZZI², ANDREA VITTURI³,
ANDREA MAZZUCCATO³

16.1. PREMESSA

Con il termine “subsidenza” si intende ogni movimento di abbassamento della superficie terrestre indipendentemente dalla causa che lo ha prodotto, dal suo sviluppo areale, velocità di esplicazione, evoluzione temporale e alterazioni ambientali che ne conseguono. La subsidenza è l'ultimo stadio, e il risultato in superficie, di una serie di processi che si sviluppano nel sottosuolo e che, in qualche modo, sono correlati alla struttura geologica/geomeccanica del territorio; particolari caratteristiche dei terreni possono infatti favorire, accelerare o impedire tali processi. In generale, la subsidenza avviene in modo differenziale nel tempo e nello spazio con tassi di abbassamento annui variabili dal millimetro al centimetro e un'estensione dell'area coinvolta da locale a regionale.

La subsidenza avviene per cause sia naturali sia antropo-indotte che talora si sommano nella risultante. L'intervento dell'uomo agisce spesso da “catalizzatore”, influenzando in modo considerevole il fenomeno, o da “promotore” determinandone l'innescio. In genere l'abbassamento del suolo legato a cause naturali si sviluppa a scala regionale e ha un'evoluzione lenta, avvertibile in tempi storici o addirittura geologici; non producendo effetti immediati sul territorio passa spesso inosservata. La subsidenza antropica invece si esplica di regola in tempi relativamente brevi (al massimo qualche decina di anni), ha un'espansione territoriale più limitata ma con effetti che possono compromettere fortemente l'ambiente, le opere e le attività umane nel caso in cui non si intervenga con azioni di controllo e gestione.

Le principali cause di subsidenza naturale sono attribuibili a processi tettonici profondi (movimenti orogenetici, attività vulcanica e attività sismica), all'abbassamento del substrato pliocenico per il carico geostatico (peso dei sedimenti sovrastanti), a trasformazioni chimico-fisiche (diagenesi) dei sedimenti per effetto del carico litostatico, alla compattazione naturale dei sedimenti non consolidati depositatisi sullo strato pliocenico, a movimenti isostatici. Altre cause minori e/o concomitanti possono essere riconosciute nelle modifiche dello stato fisico, ad esempio a seguito del prosciugamento naturale di bacini lacustri o lagunari con processi di compattazione e ossidazione di materiali organici.

La subsidenza antropica più diffusa sia per estensione che per magnitudo del fenomeno è quella indotta dalla compattazione del suolo generata dallo sfruttamento eccessivo di fluidi sotterranei. L'acqua è senza paragoni il fluido più estratto, ma la produzione di idrocarburi, petrolio e gas, anche in associazione tra

loro o con acqua, è altresì causa di subsidenze elevate. Benché vi siano differenze “geologico-territoriali” nelle aree dove i fluidi sono estratti, i principi che regolano il rapporto causa-effetto sono sostanzialmente gli stessi. A seguito del prelievo la pressione originaria del fluido sotterraneo diminuisce causando un incremento della tensione effettiva tra i grani della formazione; questo incremento provoca una deformazione della matrice solida del terreno, a seguito del “riassestamento” dei grani, e quindi una compattazione cui consegue una riduzione dello spessore che si traduce in un abbassamento della superficie del suolo.

Anche le bonifiche, soprattutto quelle idrauliche, rappresentano una delle trasformazioni antropiche all'ambiente che comporta seri problemi di subsidenza. In genere il tasso di abbassamento dei suoli bonificati, ossia la velocità di esplicazione, è direttamente proporzionale all'abbassamento della falda freatica e si realizza per due processi principali: uno geomeccanico, che comporta la riduzione di volume per compattazione, e uno biochimico che avviene per ossidazione dei terreni ad alto contenuto organico (torbe). In questo caso il drenaggio intenso dei terreni bonificati fa sì che i suoli torbosi, venuti a contatto con l'atmosfera, si ossidino e perdano massa rilasciando nell'atmosfera CO₂ (Fig. 16.1).

Anche l'estrazione di materiali solidi dal sottosuolo può provocare subsidenza. Questo processo differisce sensibilmente da quello per estrazione di fluidi. Esso si esplica sia con graduale abbassamento dei terreni a copertura dell'intera miniera (depressioni della superficie del suolo) sia con improvvisi collassi dei singoli cunicoli della miniera (buchi in superficie). La coltivazione di miniere, ad esempio giacimenti di carbone o di sali, ha talora indotto effetti disastrosi sul territorio, anche su vaste superfici, ma con tempi di realizzo anche superiori al secolo e successivi alla chiusura della stessa miniera. Il tempo richiesto per il verificarsi di fessurazioni o cavità in superficie appare ancora aleatorio, per cui, contrariamente a quanto si fa per i fluidi, è assai difficile sviluppare modelli matematici di previsione, sia temporale che di magnitudo, del fenomeno.

A completamento di questa sintesi informativa, va menzionato anche l'abbassamento del suolo per applicazione di carichi in superficie (edifici, rilevati ecc). Il processo di compattazione che avviene per un sovraccarico in superficie, su terreni non consolidati,

¹ Istituto di Scienze Marine, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Venezia.

² Gamma Remote Sensing (Svizzera).

³ Provincia di Venezia - Servizio Geologico e Difesa del Suolo.

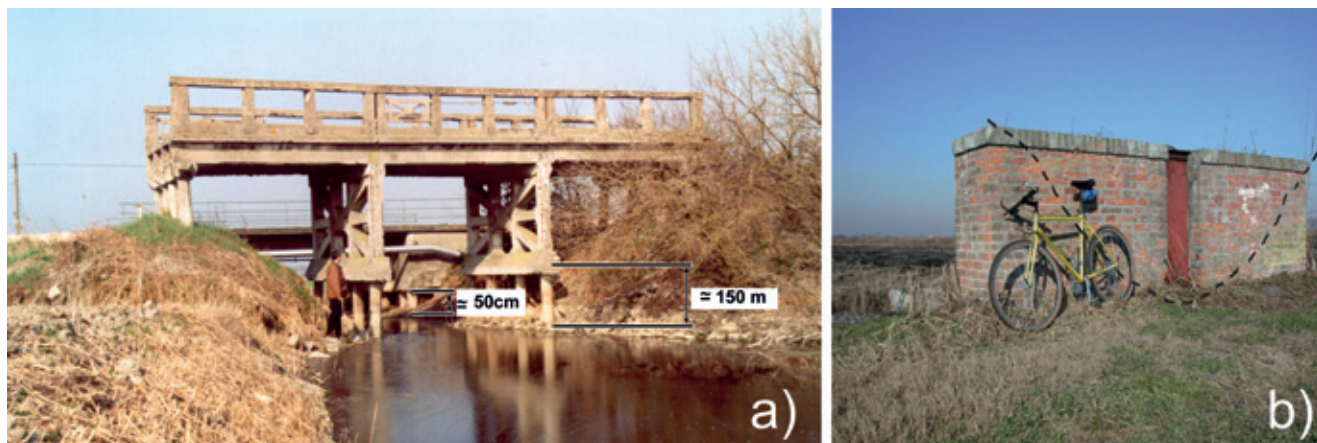


Fig. 16.1 - Effetti della subsidenza indotta dall'ossidazione dei terreni organici: a) In primo piano il vecchio ponte costruito negli anni '20 con i piloni estrusi per oltre 150 cm. Sullo sfondo il nuovo ponte con i piloni estrusi per circa 50 cm (da TOSI *et al.*, 2000). b) Una vecchia chiusa, costruita originariamente per bloccare il flusso d'acqua in un canale di scolo, è completamente protrusa sopra il piano campagna. La linea a tratteggio indica la traccia della sezione del canale secondo quella che doveva essere la sua ubicazione originale (da GAMBOLATI *et al.*, 2005).

è lo stesso di quello che si esplica per estrazione di fluidi, ovvero un aumento della tensione intergranulare efficace che provoca una diminuzione dello spessore dei sedimenti. Va comunque specificato che in generale questi fenomeni sono limitati alle aree di intervento, e pertanto è più corretto parlare di "consolidazione" piuttosto che di "subsidenza".

Il tasso di subsidenza si quantifica confrontando le quote altimetriche del suolo rilevate in momenti temporali successivi; le misure possono essere acquisite utilizzando diverse tecniche, sia "da terra" che "remote", ma che in comune hanno necessariamente lo stesso riferimento ad un punto "stabile" o del quale è noto il movimento. E' infatti difficile assicurare la completa stabilità di un punto e ritenerlo quindi verticalmente fisso; tuttavia presentando alcune zone movimenti decisamente limitati, e quindi trascurabili rispetto a quelli indotti dal processo di subsidenza che interessa studiare, queste si possono assumere stabili e quindi di riferimento senza influenzare il risultato.

16.2. INTRODUZIONE

Con l'elaborazione di una mappa della subsidenza del comprensorio lagunare veneziano per il periodo 1973-1993 si concluse il primo ciclo di studi sulla subsidenza della laguna e della città di Venezia (CARBOGNIN *et al.*, 1994; CARBOGNIN & TOSI, 1995; CARBOGNIN *et al.*, 1995; TEATINI *et al.*, 1995) quale tema prioritario delle ricerche per la salvaguardia condotte presso ISDGM-CNR (oggi ISMAR-CNR, Venezia). Furono individuate due aree a diverso comportamento altimetrico, una stabile o quasi-stabile, corrispondente alla laguna centrale ivi compresa Venezia, e un'altra subsidente, corrispondente alle estremità lagunari e parte dei litorali. Se da un lato i risultati rassicuravano sull'arresto della subsidenza indotta dai pompaggi industriali di acque sotterranee, e sulla stabilità della città lagunare, dall'altro attestavano la necessità di approfondire ed ampliare le ricerche sul processo subsidenziale sia dal punto di vista territoriale,

uscendo dai confini lagunari in senso stretto, che delle sue componenti, che metodologico. Sul finire degli anni novanta sono stati iniziati alcuni studi che hanno interessato il comprensorio meridionale dove, per le caratteristiche geomorfologiche del territorio, la subsidenza induce un serio impatto ambientale e socio-economico; in seguito l'analisi si è ampliata verso le aree nord-orientali, e poi a quelle centrali, della provincia di Venezia.

Ciò è stato possibile grazie a specifici progetti, molti dei quali promossi dalla Provincia di Venezia, e in particolare dal Servizio Geologico provinciale, col supporto di numerosi Enti pubblici quali Magistrato alle Acque di Venezia (MAV), Provincia di Padova, diversi Comuni e Consorzi di bonifica, che sono stati condotti e cofinanziati dal CNR di Venezia (Fig. 16.2).

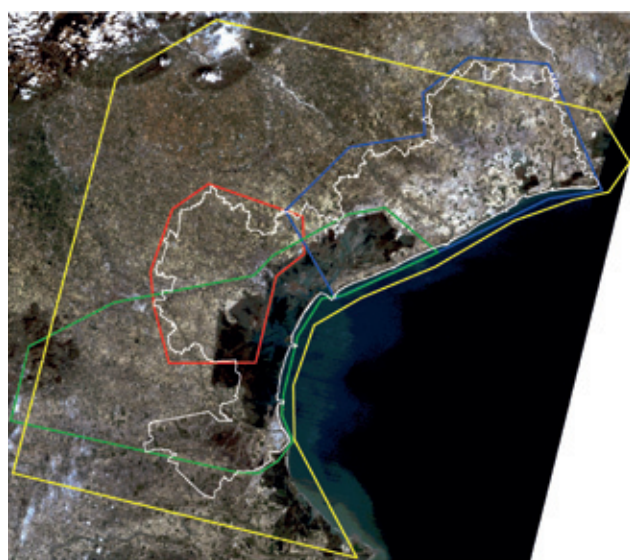


Fig. 16.2 - Limite territoriale della provincia di Venezia (linea bianca) con evidenziate le aree di interesse dei progetti sviluppati per lo studio della subsidenza: linea gialla Progetto VENEZIA, dell'Agenzia Spaziale Europea e condotto dal CNR-ISMAR; linea verde Progetto ISES, linea blu IRMA, linea rossa Progetto ERA.

Di fondamentale importanza sono risultati i Progetti:

- ISES (*Intrusione Salina E Subsidenza*) impostato nel 1999 e conclusosi nel 2002, che ha annoverato fra i suoi scopi quello di istituire una rete di monitoraggio altimetrico nelle aree del bacino scolante meridionale (TOSI *et al.*, 2000; CARBOGNIN & TOSI, 2003) (Fig. 16.3);
- IRMA (*Integrazione Rete di Monitoraggio Altimetrico*) che, con lo stesso scopo, ha interessato le aree provinciali nord-orientali, comprese tra il margine lagunare settentrionale e il Fiume Tagliamento (Fig. 16.4) e si è svolto nel triennio 2004-2006 (TOSI *et al.*, 2007a);
- ERA (*Estensione della Rete Altimetrica ISES-IRMA*), realizzato nel periodo 2008-2010, che ha completato la rete altimetrica provinciale, carente nell'area centrale (Fig. 16.5).



Fig. 16.3 - Rete di monitoraggio altimetrico ISES istituita nel 1999.



Fig. 16.4 - Rete di monitoraggio altimetrico IRMA istituita nel 2004.



Fig. 16.5 - Rete di monitoraggio altimetrico ERA istituita nel 2009.

Si intende qui fornire una visione sinottica della subsidenza media del territorio della provincia di Venezia per il decennio 1992-2002 nel quale sono a disposizione misure altimetriche confrontabili e derivanti dall'integrazione di diverse tecniche di monitoraggio.

Fino al 2000 i rilievi altimetrici si sono basati su linee di livellazione che si sviluppavano lungo un percorso circumlagunare con partenza da capisaldi stabili pedemontani e trevigiani (a Venezia, che per importanza è sempre stata l'area più studiata e controllata, esisteva già una fitta rete di capisaldi). Con i nuovi progetti sono state istituite nuove linee di livellazione e contemporaneamente approfondite le tecniche di monitoraggio della subsidenza basate su misure satellitari con il GPS, e, più recentemente, con l'analisi di immagini radar di tipo SAR.

Con l'intendimento di potenziare le possibilità e la qualità del monitoraggio, sia in specifiche aree di interesse che a più ampia scala, è stata quindi sviluppata un'originale procedura di integrazione dei risultati forniti dalle diverse metodologie, cioè livellazioni, GPS differenziale e in continuo, interferometria satellitare convenzionale (InSAR) e interferometria su riflettori puntuali (IPTA), in modo da superare i limiti di ogni singola tecnica di rilevamento. Tale sistema di monitoraggio integrato (SIMS) (cfr. § 16.5) ha permesso di ricostruire gli spostamenti verticali di vaste aree con elevata risoluzione spaziale e precisione verticale millimetrica (TEATINI *et al.*, 2005).

La mappa prodotta, che riporta le isolinee di velocità di abbassamento del suolo (isocinetiche) con una rappresentazione utile ai fini della pianificazione territoriale (1:50.000 nell'originale), è una rielaborazione della mappa a scala regionale realizzata attraverso il SIMS nel 2005 (CARBOGNIN *et al.*, 2005b; TEATINI *et al.*, 2005). La mappa è integrata da una tabella di classi di criticità redatta in funzione dell'assetto morfologico del territorio (v. Tab. 16.2).

16.3. SCOPI E LIMITI

Lo scopo di questo lavoro è quello di descrivere in modo schematico i risultati ottenuti in termini di velocità di abbassamento del suolo per facilitare la traduzione da valori quantitativi a informazioni descrittive più generali ma indicative dei vari livelli di gravità del fenomeno.

E' bene sottolineare che esula dai nostri intenti indagare sulle cause del processo subsidenziale; ciononostante verranno riportate alcune considerazioni sulle sue componenti e sui meccanismi che lo originano per poterne meglio comprendere l'entità e la distribuzione spaziale.

La determinazione precisa delle cause degli abbassamenti del suolo richiede infatti studi specifici e complessi, in parte già condotti in altra sede (CARBOGNIN *et al.*, 1981; 2005a; TOSI *et al.*, 2009a). E' utile rammentare che in un territorio molto esteso e con assetto fisiografico variabile e articolato come quello della provincia di Venezia, le cause di subsidenza oltre ad essere molteplici (sfruttamento di acque sotterranee, consolidazione naturale di depositi recenti, ossidazione dei terreni organici, salinizzazione delle acque interstiziali, tettonica) sono anche generalmente concomitanti (TOSI *et al.*, 2009a; TOSI *et al.*, 2010). La loro determinazione richiede diverse e ulteriori conoscenze ad esempio sul sistema acquifero e sul tipo di emungimenti, sulle sequenze litostratigrafiche e altre tipologie di misure, quali il monitoraggio stagionale dei livelli piezometrici, nonché tutta una serie di analisi *in situ* e in laboratorio per la determinazione dei caratteri geologici, geotecnici e idrogeologici dei terreni. Attraverso il monitoraggio altimetrico si definisce solamente la magnitudo del processo in atto.

Si fa presente inoltre che, malgrado l'estesa copertura areale dei dati esistenti per il rilievo altimetrico, i bacini lagunari di Venezia, Caorle e Bibione non sono coperti dalla rete di monitoraggio. Infatti gli specchi d'acqua non si prestano a misure altimetriche e le tecniche di controllo sia tradizionali che satellitari risultano, qualora possibili, molto dispendiose in termini economici.

La necessità del monitoraggio di queste aree è oggi un fatto appurato, e nel 2003 è iniziata la sperimentazione delle misure satellitari dei movimenti verticali del bacino lagunare attraverso l'istituzione di appositi riflettori artificiali (CR) (cfr. § 16.4.4.2). Verificata la loro efficacia, nel 2006 (Progetto INLET-1 con finanziamento del MAV) è stata installata una rete di circa 60 CR per il monitoraggio della subsidenza nel bacino lagunare veneziano (Progetto INLET-2).

16.4. DATI UTILIZZATI E METODOLOGIE DI ANALISI

I dati altimetrici utilizzati sono stati direttamente acquisiti ed elaborati dal Gruppo di Lavoro per lo Studio dei Movimenti del Suolo, costituito da ricercatori del CNR

ISMAR Venezia, del DMMMSA (Università di Padova) e di GAMMA REMOTE SENSING (Svizzera).

16.4.1. Dati disponibili

La carta della subsidenza del territorio afferente alla provincia di Venezia è stata realizzata utilizzando i dati disponibili provenienti dalle seguenti ricerche:

- Progetto Finalizzato CNR "Sistema Lagunare Veneziano" (completato nel 1993): si tratta di livellazioni eseguite da ISDGM (oggi ISMAR) del CNR (CARBOGNIN *et al.*, 1994; CARBOGNIN & TOSI, 1995);
- Progetto ISES (2002): ripetizione delle livellazioni lungo le linee del 1993 e misure GPS differenziale (DGPS) nel 2000 e 2003 sulla rete istituita nell'ambito del progetto (TOSI *et al.*, 2000; CARBOGNIN & TOSI, 2003);
- Progetto "SOPAC": misure GPS in continuo (CGPS) su stazioni permanenti installate dal MAV (2003);
- Progetto VENEZIA: Interferometria Differenziale SAR (InSAR) e analisi SAR su riflettori puntuali (IPTA) per il periodo 1992-2002 (STROZZI *et al.*, 2003) sull'intero *frame* n. 2691 dei satelliti ERS1/2 dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA).

La Tab. 16.1 riepiloga le serie di dati utilizzati per questo lavoro e i progetti di riferimento.

Nei paragrafi successivi vengono riportate le ubicazioni delle diverse tipologie di dati altimetrici presenti all'interno del territorio provinciale di Venezia ed utilizzati per l'elaborazione integrata.

	Livellazioni	DGPS	CGPS	InSAR	IPTA
Progetto Finalizzato CNR	x				
Progetto ISES	x	x			
Progetto SOPAC			x		
Progetto VENEZIA				x	x

Tab. 16.1 - Tabella riassuntiva dei dati utilizzati.

16.4.2. Livellazioni

Le livellazioni analizzate si riferiscono alle misure ISDGM-CNR del 1993 e a quelle ISES del 2000. Le misure idonee al confronto altimetrico tra i due rilievi sono relative ai capisaldi ubicati in Fig. 16.6.

16.4.3. GPS

La rete di monitoraggio complessiva, che si sviluppa per oltre 1500 km, comprende 170 capisaldi che costituiscono la rete GPS.

16.4.3.1. GPS differenziale (DGPS)

I capisaldi GPS confrontabili sui quali sono state effettuate misure differenziali in modalità statica con sessioni temporali di 4-8 ore sono riportati in Fig. 16.7.



Fig. 16.6 - Ubicazione dei capisaldi di livellazione presenti in provincia di Venezia idonei alla quantificazione della subsidenza nel periodo 1993-2000.

Il confronto si riferisce alle misure ISES condotte negli anni 2000 e 2003.

16.4.3.2. GPS in continuo (CGPS)

Nel territorio provinciale sono state istituite alla fine degli anni '90 tre stazioni GPS permanenti delle quali si dispone di una serie significativa di misure: la stazione ASI di Venezia e le due stazioni del Magistrato alle Acque a Chioggia e a Cavallino. La loro ubicazione è riportata in Fig. 16.8.

Si fa presente che recentemente le stazioni CGPS ubicate nel territorio provinciale sono aumentate; si citano come esempio quelle all'Arsenale e al Lido (ISMAR-CNR) e quelle a Marghera (Morgan srl).

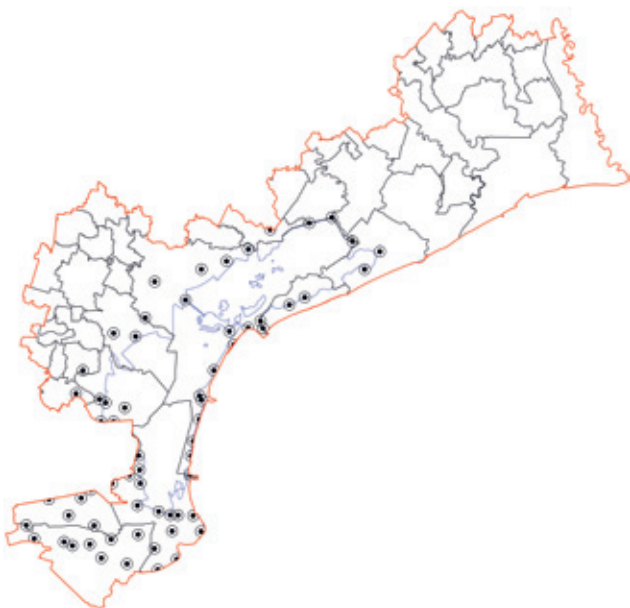


Fig. 16.7 - Ubicazione dei capisaldi DGPS utilizzati per la quantificazione della subsidenza presenti in provincia di Venezia.

16.4.4. Interferometria SAR

I dati utilizzati sono relativi alle elaborazioni eseguite nel Progetto "VENEZIA" finanziato dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) al quale hanno partecipato ISMAR-CNR (Venezia) e Gamma Remote Sensing. Si tratta di elaborazioni delle immagini radar acquisite dai satelliti ERS-1 e ERS-2 di ESA.

Le elaborazioni interferometriche sono state condotte con entrambe le metodologie di analisi attualmente a disposizione che sono caratterizzate agli acronimi InSAR e IPTA.

16.4.4.1. InSAR

InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) è una tecnica sviluppata all'inizio degli anni '90 che ha raggiunto risultati significativi in termini di accuratezza tanto da poter integrare, o sostituire in molti casi, le misure tradizionali nel controllo delle aree subsidenti.



Fig. 16.8 - Ubicazione delle stazioni CGPS permanenti presenti in provincia di Venezia nei primi anni 2000.

Questa metodologia risulta particolarmente efficace sulle aree urbanizzate e in applicazioni a grande scala, mentre presenta maggiori problematiche in zone rurali scarsamente antropizzate. Le zone coperte da tale tipologia di misura nella provincia di Venezia sono riportate in Fig. 16.9.

16.4.4.2. IPTA

IPTA (*Interferometric Point Target Analysis*) è una metodologia sviluppata dal 2001; permette di condurre con maggiore accuratezza di InSAR delle misure di spostamento da satellite su singole strutture antropiche o naturali di tipo puntuale presenti nel territorio chiamate "riflettori" (*Point Targets* o PTs). I riflettori adatti a questo tipo di indagine possono trovarsi anche in aree rurali o poco urbanizzate (TEATINI *et al.*, 2007a; TEATINI *et al.*, 2009). La Fig. 16.10 mostra

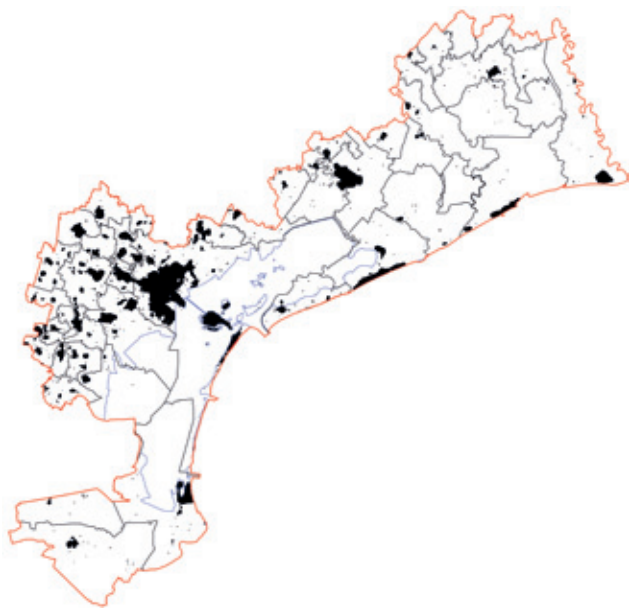


Fig. 16.9 - Ubicazione delle aree coperte da misure InSAR presenti in provincia di Venezia.

la notevole presenza di riflettori nella pianura costiera e lungo i litorali e peraltro evidenzia la loro carenza nel bacino lagunare.

Proprio per ovviare a tali lacune il Magistrato alle Acque di Venezia ha affidato nel 2005 a ISMAR-CNR (Venezia) il Progetto INLET-1 (2005-2007) ed il Progetto INLET-2 (2009-2010) per la misurazione del movimento del suolo dello specchio lagunare di Venezia con l'applicazione del metodo IPTA previa installazione di 60 riflettori artificiali (*Corner Reflectors* o CRs) su barene naturali e artificiali, motte e argini di conterminazione delle valli da pesca (TEATINI *et al.*, 2007b).

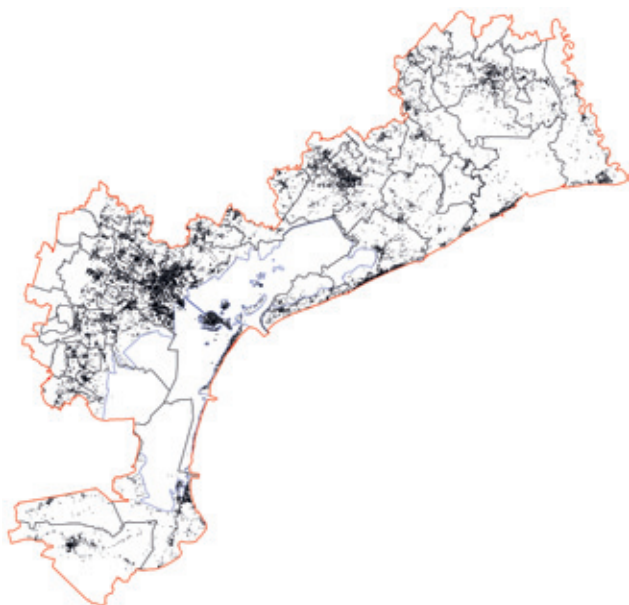


Fig. 16.10 - Ubicazione dei riflettori naturali (PT) presenti in provincia di Venezia.

16.5. ELABORAZIONI

La mappatura della subsidenza è stata ottenuta attraverso l'applicazione del "sistema di monitoraggio integrato" (SIMS), sviluppata, come accennato in precedenza, con l'intendimento di migliorare le possibilità e la qualità del monitoraggio, sia in specifiche aree di interesse che a scala regionale, integrando i risultati forniti dalle diverse metodologie in modo da superare i limiti di ogni singola tecnica di rilevamento (TEATINI *et al.*, 2005).

Il SIMS ha consentito, attraverso una complessa serie di procedure (quali omogeneizzazione e validazioni incrociate, l'eliminazione di dati non rappresentativi, il ricampionamento ed elaborazioni statistiche), di produrre una carta di subsidenza alla scala 1:50.000 utilizzando al meglio tutte le misure a disposizione. Il diagramma di flusso con le principali fasi che compongono il SIMS è riportato in Fig. 16.11.

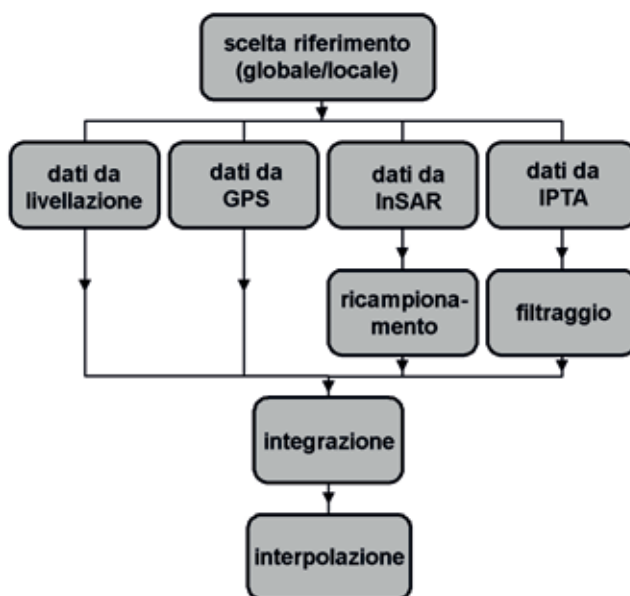


Fig. 16.11 - Diagramma di flusso con le diverse fasi che compongono il SIMS (modificato da TEATINI *et al.*, 2005).

16.5.1. Omogeneizzazione e calibrazione

Tutti i dati altimetrici considerati sono stati omogeneizzati e riportati alla quota di riferimento del caposaldo di Treviso. E' stata eseguita la verifica di confrontabilità delle misure di livellazione e GPS eliminando quelle relative a capisaldi abbandonati e di nuova istituzione.

I dati SAR sono stati inizialmente calibrati rispetto alle misure altimetriche tradizionali. Successivamente, i dati InSAR sono stati preprocessati su una griglia di 250×250 m mentre quelli forniti da IPTA sono stati filtrati per eliminare gli spostamenti non connessi ai processi di subsidenza (ad esempio dovuti a cedimenti della struttura riflettente).

Tutti i dati sono stati quindi integrati in un unico *dataset* per procedere alla loro interpolazione. In Fig. 16.12 è riportata l'ubicazione dell'intero *dataset* utilizzato per l'elaborazione SIMS.

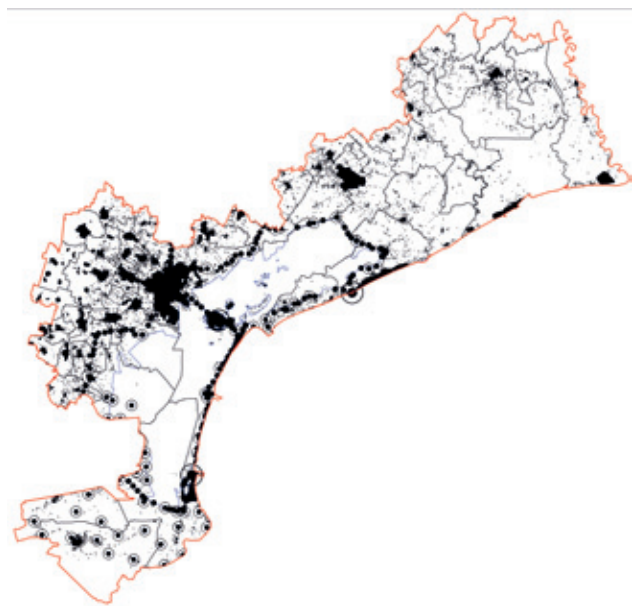


Fig. 16.12 - Ubicazione dei dati utilizzati per l'elaborazione SIMS.

16.5.2. Interpolazione dei dati

La procedura utilizzata per la realizzazione della mappa di subsidenza prevede l'applicazione di un metodo di *gridding* per generare tramite interpolazione un valore della variabile di interesse in ogni cella di un griglia regolare a partire dalle misure disponibili.

In ambito geologico gli errori presenti nei valori da analizzare, la loro limitatezza, irregolarità e non simultaneità di registrazione richiedono generalmente l'utilizzo di tecniche di interpolazione statistica tipo *kriging* (CARBOGNIN & VOLPI, 1980; CRESSIE, 1991) piuttosto che tradizionali metodi di interpolazione deterministica. Inoltre i metodi geostatistici, oltre ad elaborare in modo obiettivo tutte le informazioni

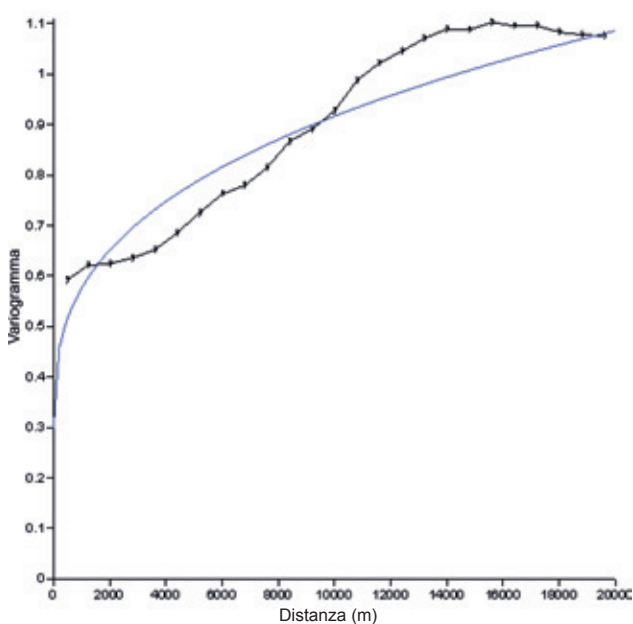


Fig. 16.13 - Variogramma sperimentale costruito a partire dal *dataset* di misure di spostamento disponibile nel territorio provinciale e variogramma teorico utilizzato per la mappatura.

disponibili per mezzo di funzioni tipo variogramma (Fig. 16.13) o covarianza, forniscono anche una valutazione sull'attendibilità del valore ricostruito.

Dopo opportune elaborazioni preliminari, si è stabilito di utilizzare una griglia regolare con maglie di 500 m di lato. In Fig. 16.14 è riportata la griglia di interpolazione utilizzata per produrre la mappa di subsidenza.

Data la disomogeneità spaziale della distribuzione delle misure, i valori ricostruiti presentano una

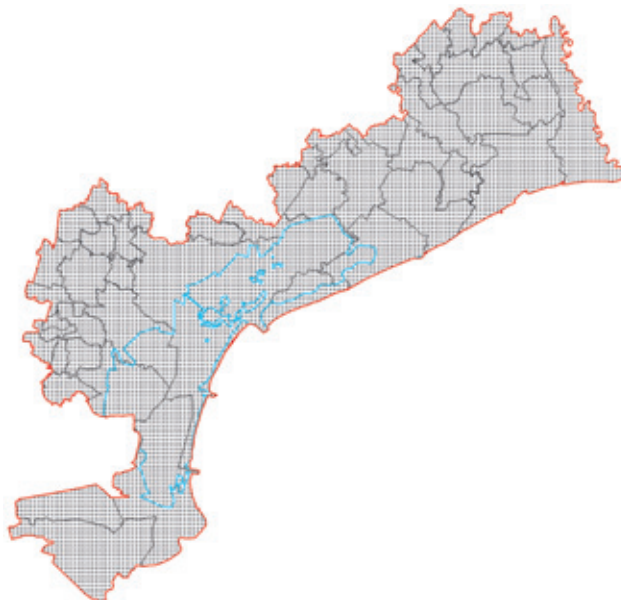


Fig. 16.14 - Griglia di interpolazione dei dati utilizzata per produrre la mappa della velocità di subsidenza.

“attendibilità” variabile arealmente che deve essere considerata nell'interpretare la carta della subsidenza. L'attendibilità della ricostruzione è rappresentata attraverso la deviazione *standard* associata ai valori interpolati (Fig. 16.15).

Come prevedibile, le deviazioni *standard* presentano

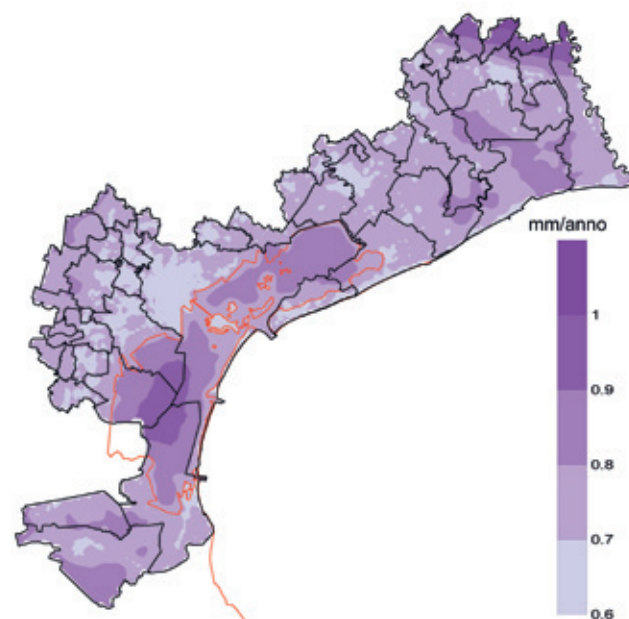


Fig. 16.15 - Mappa della deviazione *standard* associata alla subsidenza.

i massimi valori nei settori lagunari interni non antropizzati e quindi il dato là interpolato ha una minore affidabilità. Analogamente dicasi per le zone umide e/o agricole alle estremità settentrionale e meridionale del territorio provinciale ove non sono a disposizione delle misure in quanto esterne alle immagini ERS-1 e ERS-2 analizzate.

16.6. DETERMINAZIONE DELLE AREE SUBSIDENTI

16.6.1. Criteri di classificazione

Com'è noto la subsidenza, che ha componenti sia naturali che antropiche, interessa l'intera area provinciale in maniera non uniforme, più o meno sostenibile, ovvero con rilevanza territoriale più o meno considerevole.

In generale la gravità del processo subsidenziale non dipende esclusivamente dalla sua magnitudo assoluta, ma anche dalla posizione geografica dell'area coinvolta nel processo, dall'altimetria della zona, dal tipo di insediamento, dall'idrografia locale, eccetera, e quindi va valutata in funzione degli impatti che possono derivare all'ambiente in cui si esplica. Esempio limite, ma emblematico, quello del confronto tra la subsidenza e le relative conseguenze/preoccupazioni create dal fenomeno a Venezia e a Città del Messico; nella città lagunare una subsidenza dell'ordine dei decimetri ne sta minacciando l'integrità fisica e la stessa sopravvivenza, molto più di quanto abbiano allarmato i circa 9 metri di abbassamento registrati nella capitale messicana (CARBOGNIN, 1985). La provincia di Venezia è una realtà eterogenea che, interessando un'area di 2.469 km² (di cui circa 600 km² occupata da lagune), si presenta molto articolata dal punto di vista fisiografico, con aree urbane, di bonifica, costiere, spesso soggianti il livello marino, barenicole, oltre che lagunari e fluviali.

Ovvio che l'attenzione da porre alla subsidenza in atto va vista in funzione anziché del tipo di insediamento socio-economico e della sua vulnerabilità e pertanto rappresenta un parametro importante, ad esempio, per la pianificazione territoriale e per la protezione civile. Per tutto ciò, la classificazione della subsidenza riportata in Tab. 16.2 tiene conto della molteplicità di tali fattori.

Velocità di abbassamento (mm/anno)	Rilevanza del processo di subsidenza		
	Zone di terraferma	Zone litorali, lagunari, margine lagunare	Zone soggianti il livello marino
inferiore a 1	non rilevante	non rilevante	minima
tra 1 e 2	minima	minima	media
tra 2 e 3	media	medio-alta	alta
tra 3 e 5	medio-alta	alta	molto alta
maggiore di 5	alta	altissima	altissima

Tab. 16.2 - Classificazione della rilevanza della subsidenza relativa a zone con diverso assetto fisiografico del territorio provinciale.

16.7. MAPPATURA

La Fig. 16.16 riporta la mappa della velocità di subsidenza del territorio provinciale veneziano per il decennio 1992-2002 ottenuta come sopra descritto. Dalla sua analisi, è immediato rilevare come le aree dove la subsidenza si esplica in misura più elevata sono quelle della porzione nord-orientale della provincia, equidistribuite tra le zone del Portogruarese e del Sandomatese con la sostanziale esclusione di gran parte del territorio di Cavallino Treporti. Solo infatti nell'area nord-orientale della provincia si sono misurate velocità di subsidenza sempre superiori a 2 mm/anno, con vaste aree che raggiungono i 5 mm/anno e circoscritte località che si abbassano con tassi fino a 7 mm/anno. Per quanto riguarda il settore di Cavallino-Treporti, è bene ricordare l'influenza sul fenomeno dei notevoli emungimenti di acque artesiane e, benché la mappatura originale alla scala 1:50.000 indichi velocità medie di abbassamento del suolo fino a 2 mm/anno, in alcune zone di questo settore il processo subsidenziale raggiunge e supera velocità di 3 mm/anno.

Sulla base della classificazione della subsidenza riportata in Tab. 16.2, gli abbassamenti in atto nelle aree litoranee di questa ripartizione, al più pari a quelli delle zone di terraferma altimetricamente più sicure, richiedono una maggiore attenzione in quanto le loro caratteristiche ambientali devono essere mantenute e tutelate.

Diversa si presenta la situazione nell'area centrale dove i tassi di subsidenza sono generalmente più rassicuranti. Va evidenziato tuttavia che, a fronte della stabilità del centro storico di Venezia, delle aree di terraferma a ovest di Mestre e della parte centrale di laguna a sud di Venezia, la subsidenza in atto, dell'ordine di 2-3 mm/anno nei comuni che si affacciano

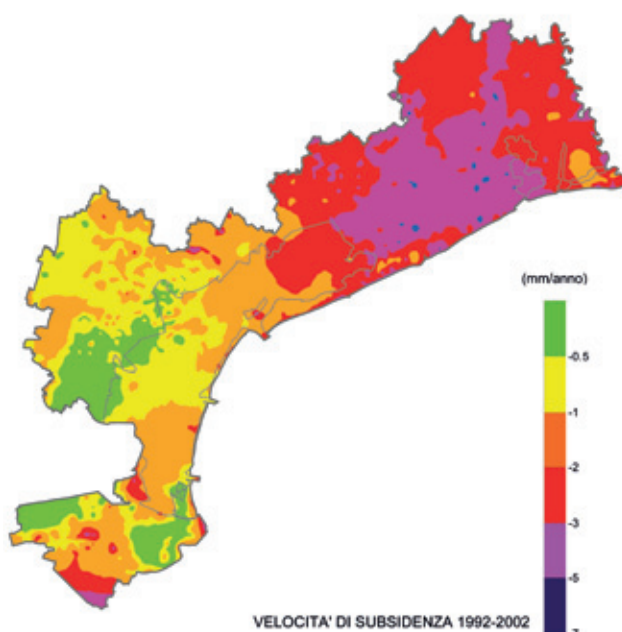


Fig. 16.16 - Mappa della velocità di subsidenza (mm/anno) per il periodo 1992-2002.

alla laguna settentrionale e quelli lungo i litorali di Lido e Pellestrina, può risultare insidiosa in funzione della ridotta altimetria e alla luce dei prospettati aumenti del livello del mare (eustatismo positivo); ciò vale anche per l'intera laguna settentrionale.

Nel settore meridionale, infine, la velocità di abbassamento del suolo è caratterizzata da una variabilità decisamente superiore a quella delle altre aree, benché il valore medio sia comparabile a quella del settore centrale. La situazione ambientale delle aree del bacino scolante meridionale risulta in generale differente da quella degli altri settori provinciali. Vaste aree si trovano a quote inferiori al l.m.m. fino anche a -4 m. Si tratta di aree bonificate ad uso agricolo in presenza di terreni torbosi affioranti dove la subsidenza geochimica (perdita di massa per ossidazione e salinizzazione dei suoli) ha indotto abbassamenti di un metro negli ultimi 70 anni. Le subsidenze più rilevanti sono osservate nelle aree di Valli e Sottomarina e nel comune di Cavarzere, al limite meridionale della provincia⁴.

Escludendo Venezia e Chioggia per l'entità della loro estensione comunale e la variabilità dei tassi misurati, i comuni del territorio provinciale di Venezia si possono raggruppare in funzione della loro subsidenza media decrescente come segue:

- tassi di abbassamento tra 3 e 5 mm/anno: Gruaro, Concordia Sagittaria, S. Stino di Livenza, Ceggia, Torre di Mosto, Eraclea, Caorle, Jesolo e San Donà di Piave;
- tassi di abbassamento tra 2 e 3 mm/anno: S. Michele al Tagliamento, Fossalta di Portogruaro, Portogruaro, Cinto Caomaggiore, Pramaggiore, Annone Veneto, Teglio Veneto, Noventa di Piave, Fossalta di Piave, Musile di Piave, Meolo e localmente Cavallino - Treporti;
- tassi di abbassamento tra 1 e 2 mm/anno: Cavallino-Treporti, Quarto d'Altino, Marcon, Scorzè, Pianiga, Fiesse d'Artico, Stra e Cavarzere;
- tassi di abbassamento inferiori a 1 mm/anno: Martellago, Salzano, Noale, Spinea, Mirano, Santa Maria di Sala, Dolo, Mira, Camponogara, Fossò, Vigonovo, Campagna Lupia, Campolongo Maggiore e Cona.

Nelle zone con presenza di torbe nei comuni di Cavarzere, Chioggia e Cona la subsidenza è però di alcuni cm/anno, come poi specificato.

L'interpolazione delle misure di subsidenza è stata effettuata su una griglia regolare di 500 m per poter individuare in maniera soddisfacente l'andamento "regionale" principale della subsidenza che caratterizza il territorio provinciale. D'altra parte questo non ha permesso di rappresentare in dettaglio il processo in zone di limitata estensione caratterizzate da velocità di subsidenza molto variabili.

Si fa presente che dal 2007 sono disponibili anche i dati del Progetto IRMA (Tosi *et al.* 2007a) e dal 2010 quelli del Progetto ERA, programmati per l'ampliamento delle reti di monitoraggio altimetrico;

di conseguenza i tassi di subsidenza si potranno calcolare lungo linee di livellazione di nuova istituzione solo in futuro, con la seconda campagna di livellazione (primo monitoraggio). Tuttavia dai dati confrontabili lungo linee di livellazione già esistenti e utilizzate per collegare la rete IRMA alla rete ISES sono stati elaborati 2 profili di subsidenza; quello riportato in Fig. 16.17 mette in luce un *trend* altimetrico decisamente negativo procedendo da Quarto d'Altino-Portegrandi a Fossalta di Portogruaro. Anche a prescindere dai due picchi di massima subsidenza di Ceggia e Portogruaro (8 cm negli ultimi quindici anni), non vi è dubbio che il processo di abbassamento del suolo in atto coinvolge questa parte del territorio in misura preoccupante con tassi da 2 a oltre 5 mm/anno.

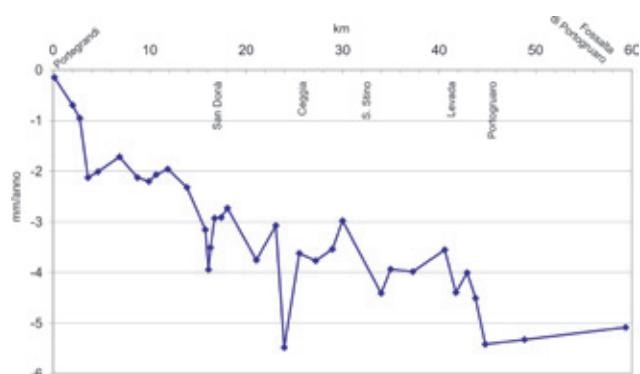


Fig. 16.17 - Movimenti verticali lungo la tratta Portegrandi - Fossalta di Portogruaro risultanti dal confronto tra le livellazioni IGMI del 1989 e la livellazione IRMA del 2004 (modificata da Tosi *et al.*, 2007a).

Il profilo di subsidenza 2000-2004 lungo le linee circumlagunari e litoranee comprese tra Portegrandi e la bocca di Lido (Fig. 16.18) indica un lieve generale ridimensionamento del fenomeno rispetto al periodo 1993-2000, più accentuato nella zona di Jesolo. Ciò malgrado, gli abbassamenti misurati nelle aree di Jesolo e Caposile restano critici come pure il nuovo picco in prossimità del molo nord della bocca di Lido (cfr. § 16.8). Il maggior numero di capisaldi confrontabili nel periodo 2000-2004 rispetto al precedente 1993-2000 ha permesso altresì di evidenziare l'elevata variabilità degli abbassamenti in atto.

Lo studio del processo di subsidenza è stato condotto sia nell'ottica della ricerca scientifica sia in quella del trasferimento dei risultati alle amministrazioni locali per la gestione e pianificazione del territorio. Il principale prodotto realizzato per supportare sia il Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) che il Piano Provinciale d'Emergenza (PPE) è stata la cartografia della classificazione del territorio sulla base al grado di "Rilevanza del processo di subsidenza" (Fig. 16.19 e Tav. 15 in scala 1:100.000).

⁴ Vedi anche i capitoli 6 "Suoli", 7 "Geomorfologia", 8 "Geologia" e le cartografie delle Tavv. 8-9-10.

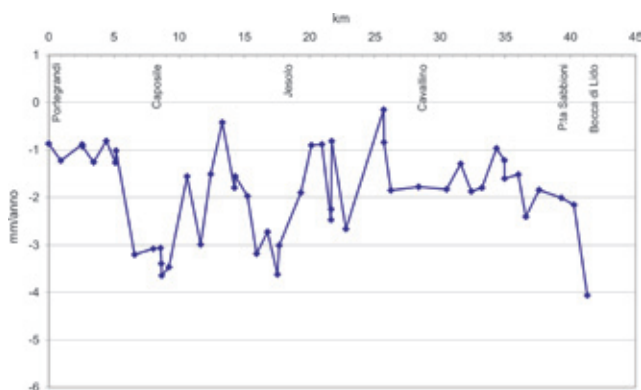


Fig. 16.18 - Movimenti verticali lungo la cirumlagunare Nord risultanti dal confronto tra le livellazioni ISES del 2000 e la livellazione IRMA del 2004 (modificata da Tosi *et al.*, 2007a).

La carta è stata ottenuta correlando il valore della velocità di subsidenza con l'assetto morfologico del territorio. Il territorio provinciale è stato suddiviso in fasce ad uguale velocità di subsidenza che sono state poi incrociate e confrontate con tre grandi aree: area soggiacente il livello marino, area lagunare-litorale e area di terraferma.

A parità di velocità, il fenomeno avrà più o meno rilevanza a seconda dell'area dove avviene.

Inoltre, le aree torbose presenti nel territorio provinciale meridionale (come cartografate nella "Unità dei Cuori" in BONDESAN *et al.*, 2008⁵), essendo caratterizzate da una velocità di subsidenza estremamente elevata (alcuni cm/anno), sono state inserite nella mappa come aree ad altissima rilevanza.

16.8. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Avvalendosi delle tecniche tradizionali e innovative di monitoraggio e dell'analisi integrata dei dati disponibili al 2002, è stata realizzata una mappa delle isocinetiche di subsidenza nella provincia di Venezia per un periodo di 11 anni, dal 1992 al 2002. Dovendo fornire una visione sinottica dell'andamento del fenomeno sull'intera estensione provinciale, in grado di evidenziare arealmente le "classi di criticità" del processo subsidenziale, la carta è stata prodotta su una griglia regolare di 500 m di lato in scala 1:50.000 in origine.

Si fa presente che il solo valore assoluto dei tassi di subsidenza non è rappresentativo di una maggiore o minore gravità del fenomeno, che è anche legata all'assetto fisiografico e socio-economico del territorio. La provincia di Venezia infatti non si presenta uniforme dal punto di vista morfologico, includendo nella sua estensione aree lagunari, litoranee, di terraferma con altimetria variabile tra circa -4 m e +21 m sul livello del mare.

La subsidenza della struttura litoranea, per esempio, potrebbe comportare anche l'aumento dei processi erosivi costieri e quindi anche del rischio da mareggiata.

La mappa della velocità di subsidenza va assolutamente letta congiuntamente a quella dei valori della deviazione *standard* dei dati interpolati, riportati in Fig. 16.15. Questa lettura combinata è indispensabile per una corretta valutazione della rappresentatività dei dati interpolati a scala regionale.

La cartografia della subsidenza evidenzia che in generale la parte nord-orientale della provincia di Venezia è quella più seriamente coinvolta dal processo subsidenziale non solo per l'entità massima dell'abbassamento misurato (fino a 5-7 mm/anno), ma anche per l'estensione del processo, senza soluzione di continuità, con un tasso medio di 3-4 mm/anno. In generale le aree a maggior subsidenza sono quelle interessate da emungimenti di acque sotterranee, quelle caratterizzate da sedimentazione recente e quelle bonificate. In relazione alla prima causa, si ricorda che in questo settore della provincia sono presenti rilevanti risorse idriche sotterranee sfruttate da pozzi la cui profondità varia da 10 m a 600 m; particolarmente importante l'area nord-orientale (portogruarese) dove si sfruttano acque termali a profondità superiori ai 400 metri. Una nota a parte riguarda il settore di Cavallino Treporti

⁵ Vedi anche il capitolo 8 "Geologia" e la cartografia di Tav. 10.

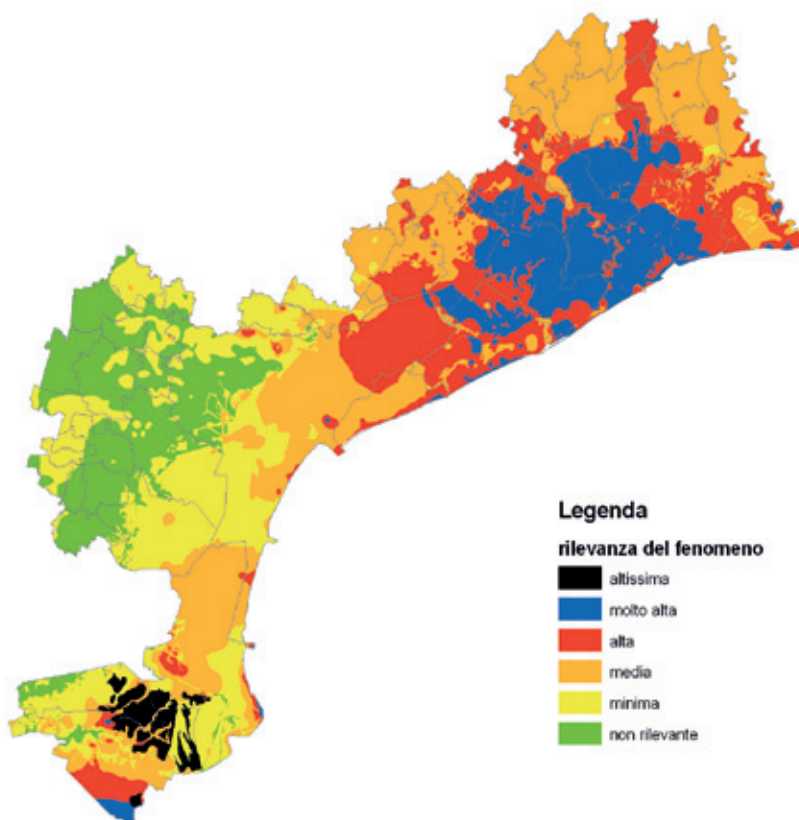


Fig. 16.19 - Mappa della rilevanza del fenomeno di subsidenza (vedi Tav. 15 alla scala 1:100.000).

ove, sempre in presenza di importanti emungimenti di acque artesiane, la mappa della subsidenza indica valori fino a 2 mm/anno, ma va puntualizzato che localmente il tasso di abbassamento raggiunge i 3-4 mm/anno, come dimostrano alcuni singoli riflettori SAR.

Nel settore centrale della provincia invece, la maggior parte del territorio si presenta sostanzialmente stabile o con velocità medie di abbassamento pari a circa 1 mm/anno. Tuttavia nelle aree a nord di Venezia il *trend* di abbassamento è più in linea con quello del settore nord-orientale mostrando tassi fino a 2-3 mm/anno.

Il settore meridionale, viceversa, pur essendo arealmente più limitato, è caratterizzato dalla maggiore variabilità della velocità di subsidenza. A fronte di zone stabili quali, ad esempio, l'area occidentale del comune di Cona e quelle in corrispondenza dei paleo-cordoni dunali tra Chioggia, Brondolo e Cavanella, si osservano punte di abbassamento superiori a 2-3 mm/anno nell'area più meridionale del comune di Cavarzere e a Sottomarina/Isola Verde. Purtroppo i dati disponibili in questa parte della provincia generalmente si riferiscono a punti (strade, case, tralicci elettrici ecc.) localizzati su strutture geologiche prevalentemente sabbiose (paleoalvei, antichi cordoni litorali ecc.) che quindi non rispecchiano il processo subsidenziale indotto dall'ossidazione dei suoli organici che può indurre perdite altimetriche anche di alcuni cm/anno nelle zone dove le torbe sono in affioramento. La mappa, nel settore meridionale compreso tra il margine lagunare e l'Adige, sottostima sicuramente la subsidenza in atto. Anche nel futuro, quando la rete ISES verrà riquotata, il processo sarà sottostimato, sia pure in misura minore. Infatti, i capisaldi ISES sono stati necessariamente istituiti su strutture consolidate e quindi non completamente rappresentative del territorio che in questo settore è costituito prevalentemente da terreni agricoli. Per una quantificazione più corretta della subsidenza nelle aree torbose si può fare riferimento a CAMPORESE *et al.*, 2006; GAMBOLATI *et al.*, 2005; GAMBOLATI *et al.*, 2006; TEATINI *et al.*, 2007a.

La Provincia di Venezia dispone oggi della rete di monitoraggio altimetrico ISES-IRMA-ERA, unica per

estensione e caratteristiche nel territorio italiano. Per completare al meglio il controllo del territorio provinciale, la rete di monitoraggio altimetrico necessiterebbe di una estensione nella parte a nord ovest dell'area centrale e, in quella meridionale, a sud del fiume Adige. Anche i bacini lagunari dovrebbero essere opportunamente investigati in quanto sede di strutture geomorfologiche importanti che giocano ruoli diversi nel processo subsidenziale (TOSI *et al.*, 2002; RIZZETTO *et al.*, 2003; CARBOGNIN *et al.*, 2006; TOSI *et al.*, 2007b; TOSI *et al.*, 2007c; ZECCHIN *et al.*, 2008; RIZZETTO *et al.*, 2009; TOSI *et al.*, 2009a; TOSI *et al.*, 2009b; ZECCHIN *et al.*, 2009).

Si ricorda che la subsidenza non è l'unico processo che mette a severo rischio la pianura costiera della provincia di Venezia; esiste anche quello dell'eustatismo che, congiuntamente al primo, può aggravare la già critica situazione altimetrica (CARBOGNIN & TOSI, 2002; CARBOGNIN *et al.*, 2004).

Alla luce di quanto emerso da questo studio e considerando le previsioni di innalzamento eustatico del livello del mare (CARBOGNIN *et al.*, 2009; CARBOGNIN *et al.*, 2010), è auspicabile che, per investigare un territorio così importante e delicato come quello della provincia di Venezia, si predispongano continui finanziamenti idonei, oltre a non vanificare il notevole sforzo sino ad ora compiuto, ad assicurare la manutenzione della rete altimetrica e a garantire che il monitoraggio proceda secondo scadenze stabilite, necessarie per il tempestivo controllo e interpretazione dei movimenti del suolo, sia nei contesti naturali, dominati da processi idro-morfologici, sia nelle aree urbanizzate, potenzialmente influenzate dai diversi interventi che possono indurre subsidenza, o dalle infrastrutture.

A questo proposito, una particolare attenzione dovrà essere volta al controllo dei possibili movimenti verticali riconducibili alla realizzazione e al funzionamento delle barriere mobili alle tre bocche di porto; nel solo 2008 gli abbassamenti, seppur circoscritti alle aree di intervento, hanno qui raggiunto i 7 cm (STROZZI *et al.*, 2009). Analogamente dicasi per altre opere ingegneristiche di rilevanza attualmente in fase di valutazione e progettazione quale, ad esempio, la metropolitana sublagunare.

EFFETTI DELLA SUBSIDENZA DELLE TORBE NEL TERRITORIO DEL CONSORZIO DI BONIFICA ADIGE EUGANEO

Giuseppe Gasparetto Stori - Consorzio di bonifica Adige Euganeo

Il nuovo Piano Generale di Bonifica e Tutela del Territorio del Consorzio di Bonifica Adige Euganeo, redatto nel 2011, ha incluso le indicazioni emerse dalle ricerche della Provincia di Venezia, dell'Università di Padova e del CNR-ISMAR di Venezia riguardanti il *trend* di subsidenza delle superfici torbose.

La pianificazione delle nuove opere idrauliche, necessarie all'espulsione delle acque superficiali in eccesso, tiene conto che una dozzina delle 56 idrovore dovrà essere potenziata con l'installazione di nuove pompe più profonde e che un centinaio di chilometri di canali dovrà essere ricalibrato per assicurare l'uso del suolo per altri decenni.

A titolo d'esempio, si riporta (Fig. 16.20) l'idrovora Ca' Bianca di Galzignano (PD) in cui l'aspirazione delle pompe è stata abbassata di 2 m nel 1988 per adeguarla all'abbassamento del suolo causato dalle torbe.

Manufatti idraulici presenti nei canali di bonifica, come ponti, sbarramenti idraulici e chiaviche di scarico o derivazione dovranno essere modificati o rifatti. Le aziende agricole insistenti nelle aree torbose saranno costrette a valutare sistemazioni agrarie e attività colturali compatibili con l'evoluzione altimetrica dei suoli. Nella Figg. 16.21 e 16.22 sono visibili gli effetti della subsidenza indotta dall'ossidazione dei terreni organici: il ponte con fondazioni su pali è rimasto altimetricamente stabile a differenza del territorio circostante che ha subito gli effetti della subsidenza.

Particolare preoccupazione riveste la progressiva correlata salinizzazione⁶ delle falde superficiali, già ora assai rilevante e diffusa nei bacini più orientali del consorzio, che può vanificare ogni utilizzo agricolo dei suoli. Opere di monitoraggio e mitigazione del fenomeno dovranno essere messe in atto con immissione artificiale di acque dolci nei canali di bonifica, la loro massima diffusione dovrà essere 'vascolarizzata' nella rete scolante-irrigua aziendale ed effettuati 'lavaggi' controllati dei terreni più compromessi.



Fig. 16.20 - Lavori di modifiche dell'idrovora Ca' Bianca di Galzignano (PD) per adeguarla all'abbassamento del suolo causato dalle torbe.

La realizzazione di invasi a scopo multiplo di fitodepurazione, conservazione della biodiversità, laminazione di piena, invaso irriguo e paesaggistico - ricreativo, quale quello già realizzato a Ca' di Mezzo in comune di Codevigo - PD (adiacente al territorio provinciale di Venezia; Fig. 16.23) si sono dimostrati efficaci anche nella mitigazione della salinizzazione delle falde.

⁶ Vedi anche il capitolo 17 "Intrusione salina".



Fig. 16.21 - Effetti della subsidenza indotta dall'ossidazione dei terreni organici.



Fig. 16.22 - Effetti della subsidenza indotta dall'ossidazione dei terreni organici.



Fig. 16.23 - Area di fitodepurazione consorziale di Ca' di Mezzo di Codevigo (PD).